

不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响

王丽园^{1,2}, 查 轩^{1,2}, 黄少燕^{1,2}, 陈世发^{1,2}, 戴金梅^{1,2}, 刘 川^{1,2}

(1. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 2. 福建师范大学, 地理科学研究所, 福州 350007)

摘要: 坡度是红壤坡面侵蚀的重要因子, 通过室内模拟降雨试验研究 3 个降雨强度 (1.0, 1.5, 2.0 mm/min), 3 个坡度 (10°, 15°, 20°) 条件下坡度对红壤坡面产流、产沙过程影响。结果表明: (1) 相同雨强下, 坡面初始产流时间随坡度增加逐渐缩短, 坡度与坡面径流量呈正相关关系; 相同坡度下, 随雨强增加初始产流时间及坡面径流量差异均减小。 (2) 坡度对红壤坡面含沙量的影响表现为平均产沙量随坡度增加而增大, 其中 15° 坡度下坡面产沙过程波动较大。 (3) 坡度对坡面径流量的贡献率在 60% 以上, 而坡度对坡面产沙量贡献率保持在 30% 左右。通过分析不同降雨条件下坡度对红壤坡面侵蚀过程影响, 以期对红壤水土流失地区的水土保持预测与措施布设提供相应理论参考。

关键词: 红壤; 坡度; 坡面产沙; 模拟降雨; 坡面产流

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0040-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.007

Effect of Slope Gradients on Red Soil Erosion Under Different Rainfall Intensity

WANG Liyuan^{1,2}, ZHA Xuan^{1,2}, HUANG Shaoyan^{1,2},

CHEN Shifa^{1,2}, DAI Jinmei^{1,2}, LIU Chuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Subtropical Mountain Ecology Funded by Ministry of Science and

Technology and Fujian Province, Fuzhou 350007; 2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: Slope gradient is an important factor affecting the surface slope erosion of red soil. The objectives of this study were to investigate the impact of slope gradients on runoff and sediment yield erosion processes. Three rainfall intensities (1.0, 1.5, 2.0 mm/min) and three slope angles (10°, 15°, 20°) were comparatively studied under simulated rainfall. Results showed that: (1) Under the same rainfall intensity, the time of the initial runoff were shortened with the increasing slope gradients on red soil, slope angle and runoff volume were positively correlated; under the same slope gradient, both the time of initial runoff and runoff volume decreased with the increasing rainfall intensity. (2) The effects of slope gradients on the sediment yield were more complicated, an increasing slope gradient generally increased the average sediment yield, which had greater volatility under 15°. (3) The contribution of slope gradients to runoff volume was more than 60%, and to sediment yield was above 30%. These findings provided theoretical basis for erosion prediction and prevention in erosion area of red soil.

Keywords: red soil; slope erosion; simulated rainfall; slope runoff

影响水土流失因素包括自然与人为两大因素, 其中自然因素包括: 气候^[1]、地形^[2]、土壤^[3]、地质因素、植被^[4]等。坡度是坡面土壤侵蚀中重要因素之一, 同时也是水土流失方程中的重要因子。南方红壤区是仅次于黄土高原的水土流失区^[5-9], 但其自然人文条件又区别于黄土高原区^[10]。南方红壤区气候温暖, 雨量丰沛、季节差异大、暴雨驱动因子影响作用更为显著, 坡地表现为蓄满产流过程, 地形起伏, 植被覆盖条件好, 水土流失问题使整个地区农业及经济持续发

展受到严重影响^[11], 裸露红壤坡地的年均土壤侵蚀强度多在 5 000 t/km² 以上, 达强烈等级^[12]。目前运用 GIS 技术对土壤侵蚀的坡度范围研究取得较大进展, 查轩等^[13]通过 GIS 方法研究退化红壤地得出土壤侵蚀主要都集中于坡度 5°~25° 的坡地上; 范丽丽等^[14]运用 GIS 技术分析得出不同坡度等级中, 15°~25° 上土壤侵蚀强度最强, 3°~8° 上土壤侵蚀强度最弱。但这并未对坡度与土壤侵蚀关系进行说明, 国内外学者多通过室内模拟降雨试验或野外径流小

区试验方法对两者关系进行分析,但试验区域自然条件不同,试验雨强、坡度设计不同,导致红壤坡面侵蚀过程中初始产流时间、入渗、产流产沙以及临界坡度等问题上学者的结论存在一定差异性^[15-26],梁志权等^[27]、胡建等^[9]学者从水动力学方向对坡度与坡面侵蚀关系进行研究;坡度与坡面侵蚀模型^[28-29]拟合中由于相关参数等原因,拟合程度上也存在差异。因此坡度与坡面侵蚀关系研究尚不完善,有待进一步研究。本文以人工模拟降雨试验为基础讨论坡度对红壤坡面侵蚀过程影响,以期对红壤水土流失地区的水土保持预测与措施布设提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验用土 本试验用土于 2016 年 9 月采自莆田市东圳库区,库区以水蚀为主,水土流失面积为 54.49 km²,占土地总面积 16.95%,其中轻、中、强、极强度流失面积分别占水土流失总面积的 64.8%,20.06%,13.73%,1.41%。供试土壤类型为赤红壤,成土母质为坡积物,质地为黏壤,土壤黏性大,呈酸性,颗粒细小、淋溶强。采样时遵循均匀、随机性原则采取 0—50 cm 的表层土,土样容重 1.33 g/cm³ 左右。

1.1.2 试验装置 模拟降雨试验所用土槽为自行设计,试验规格为长×宽×高=150 cm×50 cm×30 cm。为更好模拟自然条件情况,土槽底部均匀钻孔,钻 5 排,每排 3 个孔,土槽前部均匀钻孔,钻 3 排,每排 3 个,土槽尾部设置“V”形收集口,用来收集试验形成的径流和泥沙。

降雨器为 BX-1 型侧喷式野外模拟降雨器,降雨均匀度大于 80%,降雨调控范围在 20~200 mm/h,喷头距地面垂直高度 6 m,通过压力阀和喷头组合控制雨强和雨滴直径能够达到试验要求。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 东圳库区水土流失区以丘陵、山地为主,库区年平均降雨量 1 710~1 970 mm,降雨量年际、月际变化较大,且多集中在 7—9 月台风雷阵雨季节,易形成特强降雨带。为此本次试验设计 3 个坡度(10°,15°,20°),3 个雨强(1.0,1.5,2.0 mm/min),每次试验降雨量为 50 mm,试验设计为每个坡度分别进行 3 个雨强的降雨试验,每个试验处理重复 3 次,取 3 次平均值进行数据计算和分析,共降雨 27 场次。

1.2.2 试验过程 采集土壤在试验前过 10 mm 筛,均匀混合,填土前先在土槽底部装填 10 cm 厚的天然细沙,并铺上透水纱布,以保证土壤样品良好的透水性,试验用土分 3 层装入土槽,土层深度为 30 cm,并控制土壤容重及含水量与采样时的实测值相近。填土时采用边填充边压实的方法,每层装好后用直尺将

表面刮平,使相邻两层土壤之间能够良好结合,并减小边坡对产流、产沙等的影响,使下垫面土壤条件的变异性最小^[30-31]。每次正式降雨之前,采用 1.0 mm/min 雨强进行前期降雨至坡面产流为止,前期降雨后用塑料布覆盖并静置 24 h,使水分自由下渗以接近自然状态下土壤水分分布状况,同时保证各场次正式降雨前的土壤水分状况基本一致。每次试验前进行降雨强度率定,以确保降雨均匀度及降雨强度符合试验要求。

1.2.3 试验数据收集 降雨开始后计时,记录各坡面产流、止流时间;同时观察坡面侵蚀过程,坡面产流后开始收集径流泥沙样,每次采样时间间隔为 3 min。降雨试验结束后,用容量瓶置换的方法测定产流量,铝盒烘干法测定产沙量。

2 结果与分析

2.1 不同雨强下坡度对红壤坡面初始产流时间的影响

坡度对于坡面产流时间具有一定影响,试验条件下红壤坡面初始产流时间存在明显规律。由表 1 可知,雨强一致情况下,坡面初始产流时间随着坡度增加逐渐提前。20°坡度下的产流时间明显早于另外 2 个坡度,在 1.0 mm/min 雨强下,20°的初始产流时间比 10°、15°坡面初始产流时间分别早 4.42,3.58 min;1.5 mm/min 与 2.0 mm/min 雨强下也有类似的规律。相同雨强条件下,坡度增加致使雨滴降落坡面的垂直分力减小,坡面入渗率减小,导致坡面径流出现越早。10°~20°坡面初始产流时间并非等距减少趋势,而是随坡度增加趋势增大,由于试验小区土壤为蓄满产流,而坡面入渗条件并不是等距变化,15°~20°坡面入渗条件变化,导致其水文条件发生较大变化影响坡面初始产流时间。试验坡面初始产流时间最长为1.0 mm/min、10°坡面下的 5.72 min,最短时间为 2.0 mm/min、20°坡度下的 0.85 min,是 1.0 mm/min、20°坡面产流时间的 65%,坡面产流时间同时也受到雨强因子的影响。经方差分析可知,坡度引起坡面产流时间差异在 1.0 mm/min 雨强下最大,在 2.0 mm/min 雨强下最小,雨强增大掩盖了坡度对于产流时间的影响^[18]。坡度一致条件下,随雨强增大,坡面初始产流时间差异降低。大坡度条件下承雨面积较小,坡面初始产流时间受到雨强变化影响不明显。

表 1 不同降雨强与坡度下初始产流时间
单位:min

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	坡度/(°)		
	10	15	20
1.0	5.72	4.88	1.30
1.5	4.20	4.12	1.20
2.0	2.92	2.58	0.85

2.2 不同雨强下坡度对红壤坡面产流特征的影响

坡面径流是坡面侵蚀的动力之一。由于试验时间较短蒸发量可忽略不计,降雨量仅转化为入参与径流 2 个部分。由图 1 可知,试验条件下各坡度在不同雨强下产流过程基本一致,降雨初期,坡面径流量增加迅速,后期由于坡面结皮以及入渗稳定后,坡面径流趋于高值稳定状态。对比相同雨强下 3 个坡度变化趋势发现,在降雨初期径流量曲线倾斜率随坡度的增加而增大,受雨强影响不明显。

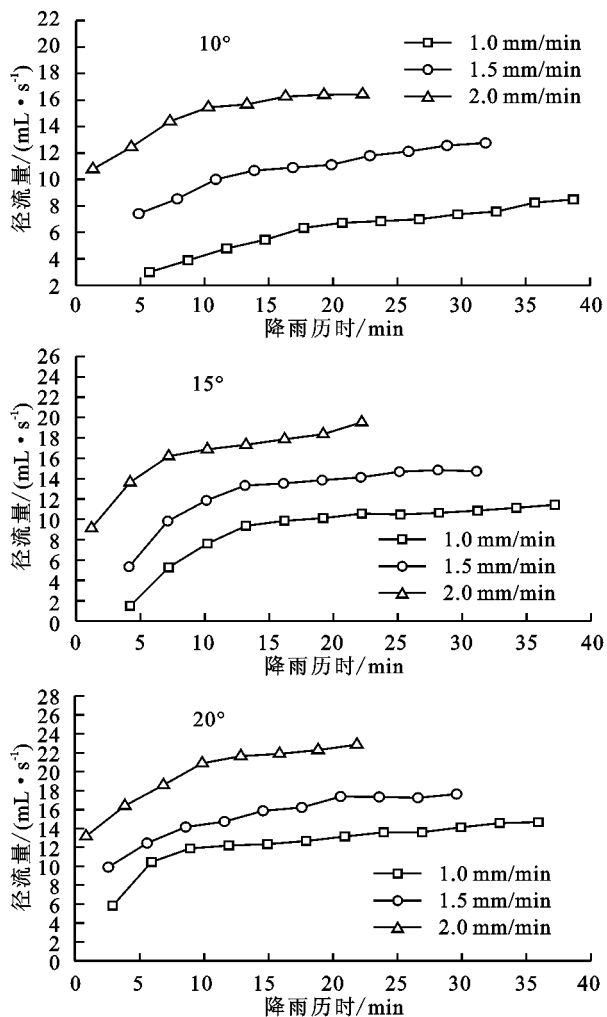


图 1 不同雨强及坡度下红壤坡面径流量变化

以 1.0 mm/min 雨强为例,径流量初期曲线倾斜率在 10°、15°、20°坡面下分别为 0.24、0.89、1.01。在降雨后期径流稳定,径流量曲线近似水平,各坡面径流量倾斜率差别变化不明显,但径流量仍随坡度增加存在较大差别,由于坡度增大坡面流速增加,径流量在 10°坡面稳定在 8.41 mL/s,15°与 20°坡面径流量分别稳定在 10.74、3.47 mL/s,1.0 mm/min 雨强下,10°、15°、20°坡面的平均径流量分别为 6.31、10.78、14.73 mL/s。1.5 mm/min 与 2.0 mm/min 雨强下也有相同规律。其中 1.0 mm/min、10°条件下的坡面平均径流量最小。2.0 mm/min、20°条件下的

坡面平均径流量最大,为最小平均径流量的 3.13 倍,是 20°坡面、1.0 mm/min 雨强下平均径流量的 1.34 倍。平均径流量随坡度变化的趋势受到雨强的影响,其中雨强增大,相同坡度下由于承雨量增加,其径流量差异减小。降雨过程中,雨强一致条件下坡度增加,坡面入渗量减小致使更多降雨转换为坡面径流,同时坡度增加致使坡面水流速度加快,因此坡度越大,单位时间内坡面径流量越大。

2.3 不同雨强下坡度对红壤坡面产沙特征的影响

坡面产沙过程是研究坡地发育的基础,坡面产沙量受到坡面径流量的影响,但随降雨历时的增加,坡面产沙量与坡面径流量变化过程有明显的不同,产沙量变化过程更具波动性与复杂性。由图 2 可知,从产沙量过程曲线来看,坡度越大,坡面产沙量越大;雨强越大,坡面产沙量越大。降雨初期,坡面产沙量呈较快增长,降雨初期产沙量的增加变化与红壤本身特性关系不大,研究表明尽管不同土壤存在差异,但随着土壤水分含量的增加,坡面初始产流速度均加快,侵蚀产沙量均增大^[29-30],但与降雨初期坡面松散物质较多有关,降雨初期坡度对坡面产沙量有较大影响。3 个试验雨强在各试验坡度下产沙量曲线类似,经分析 1.5 mm/min 雨强下产沙量变化受坡度影响较大。10°坡面产沙量曲线起伏不大,较为平缓,但在 15°与 20°坡面产沙量波动大,尤其是 15°坡面产沙量出现类似“M”形的变化过程,其他学者也有相同发现^[32-33],这种波动与坡面侵蚀方式变化有关,坡面出现细沟侵蚀,使得坡面产沙量出现随机波动。1.0 mm/min 雨强下坡面产沙量曲线相对平稳,降雨中期至降雨结束产沙量曲线变化近似水平,产沙量随坡度变化的波动范围较小,维持在 0.8~1.2 g/min,降雨强度较小情况下,坡面径流深较小,坡面挟沙能量较弱,坡度影响并不明显;2.0 mm/min 雨强下在各坡度坡面产沙曲线斜率都较大,降雨 10 min 左右出现历时较短的产沙稳定阶段,出现这个阶段是由于坡面出现较为稳定的面蚀情况。

10°坡面下,降雨强度 2.0 mm/min 下平均产沙量为 3.11 g/min,1.5 mm/min 与 1.0 mm/min 雨强下坡面平均含沙量分别占 2.0 mm/min 雨强下坡面平均产沙量的 24%和 12%。在 15°与 20°坡面下也有相同规律,相同坡度下,2.0 mm/min 雨强下坡面平均产沙量差异较小,而 10°坡面差异最大,这种差异性变化主要由于坡度变化会影响到垂直坡面分力与滞雨量的不同,从而改变坡面侵蚀方式,影响产沙过程变化,雨强也对产沙量有一定影响,小坡度条件下,坡面稳定性较好,坡度对产沙量的影响程度不如雨强。

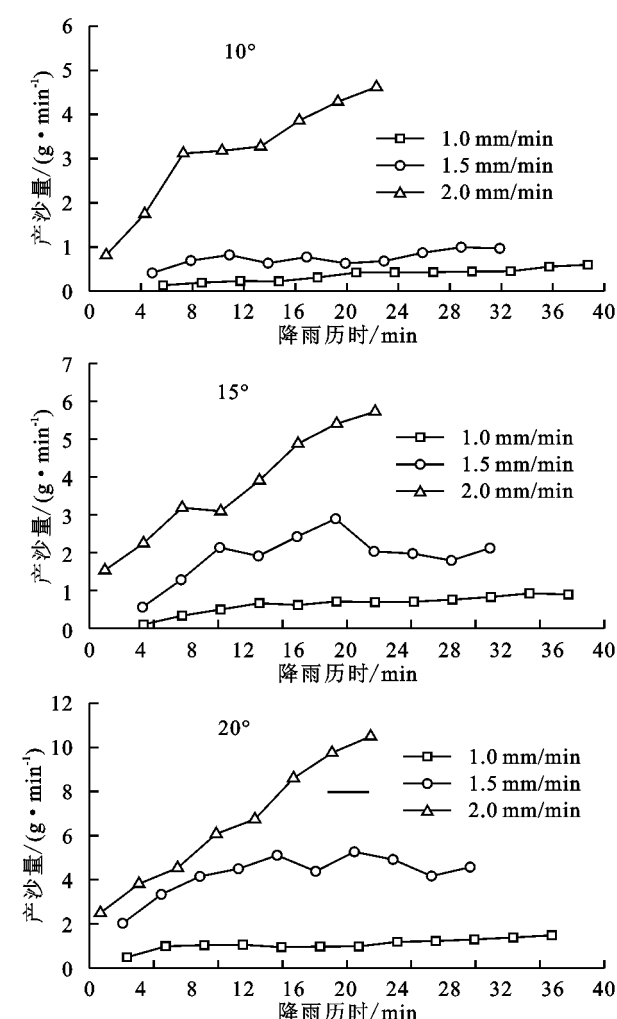


图 2 不同雨强下坡度含沙量变化过程

2.4 不同雨强下坡度对红壤坡面的累积侵蚀量的影响

不同雨强下坡度对坡面累积径流量与累积产沙量有不同影响,为研究坡度对于坡面径流量与产沙量过程影响作用大小,本文采用计算贡献率的方法^[34],坡度以 10°为基准,雨强以 1.0 mm/min 为基准。以 1.5 mm/min 为例, e_i 为 1.0 mm/min 降雨强度下各

坡度坡面侵蚀, E_i 为 1.5 mm/min 降雨强度下各坡度坡面侵蚀量,综合增量($A, A=E_i-e_1$)为由于降雨强度和坡度均增大而引起的坡面侵蚀量的增加量,综合增量($B, B=E_i-e_i$)为相同坡度坡面上由于降雨强度的增大而引起的侵蚀量的增加量, e_i-e_1 为 1.0 mm/min 下,由于坡度增大而引起的坡面侵蚀量的增加量, $(e_i-e_1)/(E_i-e_1)$ 为坡度的贡献率, $(E_i-e_i)/(E_i-e_1)$ 为降雨强度的贡献率, $i=10, 15, 20$ 。2.0 mm/min 雨强下做相同计算,结果见表 2 和表 3。

由表 2 可知,1.0~2.0 mm/min 雨强、10°~20° 坡度范围内,坡度是影响径流量的主要因素。坡度贡献率保持在 60% 以上,其中以 20°坡面下贡献率最大,达到 90% 以上。15°~20°坡度贡献率变化范围为 30% 左右,而雨强从 1.5~2.0 mm/min 贡献率变化范围为 5% 左右,坡度对径流量的影响明显大于雨强影响。

由表 3 可知,1.0~2.0 mm/min 雨强、坡度 10°~20° 范围内坡度对坡面产沙量贡献率保持在 30% 左右,雨强贡献率保持在 60% 以上。15°~20°坡度贡献率变化范围为 2%~7%,而 1.5~2.0 mm/min 雨强贡献率变化范围为 6%~14%,比坡度贡献率变化范围大。由表 3 可知,1.5 mm/min 雨强下,15°~20°坡度对产沙量贡献率下降 7.1%,但在 2.0 mm/min 雨强下 15°~20°坡度对产沙量贡献率增长了 0.8%,但从侵蚀产沙量来看并未出现临界坡度条件下的增减特征,所以 15°坡度并不是临界坡度。由于坡面产沙主要受水流剪切力影响,但径流剪切力受坡度和雨强影响显著,但是不呈现单一的线性函数关系,变化规律不明显^[17]。在野外条件下,坡面 15°~20°的过渡阶段,应更加注意坡地利用方式,尽量降低坡度对坡面侵蚀的贡献率。

表 2 不同坡度下径流量降雨强度、坡度贡献率

坡度/ (°)	1.0	1.5	2.0	综合增量/L		综合增量 A/L		综合增量 B/L		坡度贡献/%		雨强贡献/%	
	mm/min	mm/min	mm/min	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0
	侵蚀量/L	侵蚀量/L	侵蚀量/L	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min
10	13.35	19.41	21.20	6.05	7.85	0	0	6.05	7.85	0	0	100	100
15	19.58	22.69	23.21	9.33	9.86	6.23	6.23	3.11	3.63	66.7	63.2	33.3	36.8
20	26.89	27.51	28.39	14.16	15.04	13.54	13.54	0.62	1.50	95.6	90.0	4.4	10.0

注:综合增量 A 为相同雨强下,单由坡度增大时引起的坡面侵蚀量的增加;综合增量 B 为相同坡度时,单由雨强增大而引起的侵蚀量的增加。下同。

表 3 不同坡度下产沙量降雨强度、坡度贡献率

坡度/ (°)	1.0	1.5	2.0	综合增量/L		综合增量 A/L		综合增量 B/L		坡度贡献/%		雨强贡献/%	
	mm/min	mm/min	mm/min	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0
	侵蚀量/L	侵蚀量/L	侵蚀量/L	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min
10	4.39	22.36	74.70	18.0	70.3	0	0	18.0	70.3	0	0	100	100
15	23.17	57.35	89.98	53.0	85.6	18.8	18.8	34.2	66.8	35.4	21.9	64.6	78.1
20	39.16	127.23	157.54	122.8	153.2	34.8	34.8	88.1	118.4	28.3	22.7	71.7	77.3

3 结论

(1)红壤坡面初始产流时间及径流量与坡度关系密切,在恒定雨强下,坡面初始产流时间随着坡度的增加逐渐提前;径流量在降雨初期快速增大,之后呈稳定增长趋势至降雨结束。相同坡度条件下,雨强越大,初始产流时间以及径流量差异越小。

(2)坡面产沙量受坡面侵蚀方式随机变化,整体来看坡度越大,坡面产沙量越大,15°坡面产沙过程波动明显,相同雨强下,10°坡面平均产沙量差异最小。

(3)坡度对坡面产流与产沙过程贡献率不同,其中坡度对坡面径流量的贡献率起主导作用,贡献率在60%以上,随坡度增大其作用更明显;但坡度对坡面产沙量的贡献率保持在30%左右,随坡度增加贡献率变化规律不明显。

参考文献:

- [1] 肖胜生,郑海金,杨洁,等.土壤侵蚀/水土保持与气候变化的耦合关系[J].中国水土保持科学,2011,9(6):106-113.
- [2] 付兴涛,张丽萍.红壤丘陵区坡长对作物覆盖坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(5):91-98.
- [3] 魏小燕,毕华兴,霍云梅.不同土壤坡面产流产沙特征对比分析[J].水土保持学报,2016,30(4):44-48.
- [4] 张思毅,梁志权,谢真越,等.植被调控红壤坡面土壤侵蚀机理[J].水土保持学报,2016,30(3):1-5.
- [5] 盛贺伟,孙莉英,蔡强国.黄土坡面片蚀过程稳定含沙量及其影响因素[J].地理科学进展,2016,35(8):1008-1016.
- [6] 李鹏,李占斌,郑良勇.黄土陡坡土壤侵蚀临界动力机制试验研究[J].泥沙研究,2008(1):17-20.
- [7] 夏积德,吴发启,周波.黄土高原丘陵沟壑区坡地耕作方式对土壤侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,2016,30(4):64-67.
- [8] 盛贺伟.黄土区土壤类型和坡度对坡面片蚀和细沟侵蚀的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [9] 胡建,郭太龙,卓慕宁,等.华南红壤坡面产流产沙过程模拟降雨试验研究[J].生态环境学报,2013,22(5):787-791.
- [10] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [11] 秦伟,左长清,郑海金,等.赣北红壤坡地土壤流失方程关键因子的确定[J].农业工程学报,2013,29(21):115-125.
- [12] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.
- [13] 查轩,黄少燕,陈世发.退化红壤地土壤侵蚀与坡度坡向的关系:基于GIS的研究[J].自然灾害学报,2010,19(2):32-39.
- [14] 范丽丽,沈珍瑶,刘瑞民.基于GIS的大宁河流域土壤侵蚀评价及其空间特征研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(5):264-265.
- [15] 王添,任宗萍,李鹏,等.模拟降雨条件下坡度与地表糙

- 度对径流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):1-6.
- [16] 吕志备.不同坡度、容重和覆盖对坡面水土流失及入渗的影响研究[D].山西 太古:山西农业大学,2015.
- [17] 胡尧,侯雨乐,李懿.模拟降雨入渗对岷江流域红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):62-67.
- [18] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [19] 冯秀,查轩,黄少燕.人工模拟降雨条件下花岗岩红壤坡面侵蚀过程与特征分析[J].中国水土保持科学,2014,12(1):19-23.
- [20] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.
- [21] 胡尧,侯雨乐,李懿.模拟降雨入渗对岷江流域红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):62-67.
- [22] 王学强,蔡强国,和继军.红壤丘陵区水保措施在不同坡度坡耕地上优化配置的探讨[J].资源科学,2007,29(6):68-74.
- [23] Chen S, Zha X. Evaluation of soil erosion vulnerability in the Zhuxi watershed, Fujian Province, China [J]. Natural Hazards, 2016, 82(3):1589-1607.
- [24] 汪邦稳,肖胜生,张光辉,等.南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J].农业工程学报,2012,28(2):239-243.
- [25] 和继军,蔡强国,刘松波.次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1263-1268.
- [26] 张利超.降雨过程中红壤地表微地貌演变特征及侵蚀响应[D].武汉:华中农业大学,2009.
- [27] 梁志权,卓慕宁,郭太龙,等.不同雨强及坡度下坡面流的水动力特性[J].生态环境学报,2015,24(4):638-642.
- [28] 刘远利,郑粉莉,王彬,等.WEPP模型在东北黑土区的适用性评价:以坡度和水保措施为例[J].水土保持通报,2010,30(1):139-145.
- [29] 李军鹏,董卫国,孟惠芳,等.降雨条件下坡面细沟侵蚀模型及临界坡度研究[J].灾害学,2016,31(1):207-212.
- [30] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J].农业机械学报,2015,46(7):162-170.
- [31] He J J, Cai Q G, Li G Q, et al. Integrated erosion control measures and environmental effects in rocky mountainous areas in northern China [J]. International Journal of Sediment Research, 2010, 25(3):294-303.
- [32] 刘宏伟,余钟波,崔广柏.湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究[J].水利学报,2009,40(7):822-829.
- [33] 王志伟,陈志成,艾钊,等.不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):17-20.
- [34] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010(6):50-55.